

低塑性細粒分を含む砂の液状化特性について

九州工業大学大学院 学生会員 ○春野 友希
 九州工業大学大学院 正会員 永瀬 英生 廣岡 明彦
 九州工業大学 学生会員 中野 武大
 三井共同建設コンサルタント(株) 福本 圭吾

1. はじめに

河川構造物には水門や堰など様々なものが存在し、その中で河川堤防は唯一の土構造物である。また土構造物である河川堤防では液状化による沈下後の堤防高が耐震性能の照査指標である。河川堤防の液状化解析には自重変形解析法「ALID」が多く用られるが、低塑性細粒土などの特殊地盤は液状化特性が十分に解明されていないため、液状化時のせん断剛性が過小評価されることが多く、過大な沈下変形となる解析結果を得ることがある。過大評価であれば安全側であるが、河川堤防対策に必要とするコストが大幅に増加するため、コスト削減を目的として詳細な液状化発生特性や液状化後の変形特性の知見を得ることは重要である。そこで本研究においては河川堤防の基礎砂地盤が低塑性細粒分を多く含む場合について着目し、低塑性細粒分を含む砂の液状化特性について検討した。

2. 実験概要

試料には、低塑性細粒土である DL クレーと豊浦砂を用いた。試料の物理的特性を表 1 に示す。最大・最小間隙比 e_{max} 、 e_{min} の測定方法(JGS 0162)は、細粒分含有率 $F_c=5\%$ 以上の砂に対して適用範囲外であるが、参考のためこれらの値を求めている。なお、液性・塑性限界はすべて NP であり、土粒子密度は $2.619\sim 2.638(g/cm^3)$ であった。供試体は外径 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の中空円筒形とし、装置には繰返しねじりせん断試験装置を用いた。また今回対象とする地盤は細粒分含有率 $F_c=60\%$ 程度で相対密度 $D_r=80\%$ であり、 $F_c=60\%$ の場合の供試体を様々な方法で作製した結果、水中落下法によって作製したとき D_r がほぼ一致したため、各 F_c に対しても同様の作製方法により得られた D_r で実験を行った。供試体作製後には、脱気水を通水して間隙圧係数 B 値が 0.95 以上となるように供試体を飽和化し、初期有効拘束圧 $\sigma'_0=98kPa$ で等方圧密を行った。圧密終了後、非排水条件にて繰返し載荷試験を行った。繰返し載荷には載荷周波数 0.1Hz の正弦波形を用い、液状化発生の判断基準として両振幅せん断ひずみ $DA=7.5\%$ とした。繰返し回数 20 回の繰返し載荷を行った後、引き続き非排水条件で静的せん断試験を行った。なお、静的単調載荷はひずみ制御方式で行い、載荷速度は $\dot{\gamma}=5\%/min$ とした。

3. 細粒分含有率 F_c の液状化発生特性に及ぼす影響

実験により得られた繰返し応力比 R と $DA=7.5\%$ に至るまでの N_c の関係を図 1 に示し、図 1 の各細粒分含有率 F_c の結果より得られた $N_c=20$ における液状化強度比 R_{L20} を表 2 に示す。一般的に、細粒分含有率 F_c と相対密度 D_r が大きくなると R_{L20} は大きくなるとされているが、図 1 より F_c が低塑性土を主体とする場合は F_c と D_r が同時に増加しているにも関わらず、全て $F_c=20\%$ の R_{L20} より小さな値となった。これは佐藤らの研究¹⁾によると次のように説明される。すなわち、ある程度の F_c までは細粒分が砂の間隙に入りこみ、粒子の骨格構造が密実になり、 R_{L20} が大きくなる。しかし、さらに F_c が大きくなると砂粒子同士の直接接する点が少なくなっていき、最終的には砂の粒子が細粒分中に浮いたような状態となり、その結果供試体の強度は間隙を埋める細粒分に支配されるため R_{L20} は小さな値になったと考えられる。

表 1 物理的特性

$F_c(\%)$	20	40	60	80
$D_r(\%)$	55	75	80	90
e_{max}	0.865	0.926	1.137	1.434
e_{min}	0.378	0.347	0.443	0.568

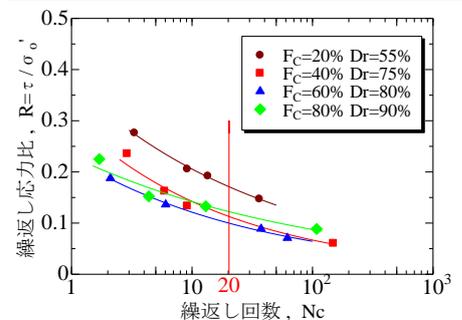


図 1 R と N_c の関係

表 2 各 F_c における R_{L20}

$F_c(\%)$	20	40	60	80
R_{L20}	0.172	0.113	0.100	0.123

4. 細粒分含有率 F_c の液状化後の変形特性に及ぼす影響

各細粒分含有率 F_c における静的単調載荷試験で得られた τ と γ の関係を図 2~図 5 に示す。ここで、静的せん断試験のみを行った結果を static とし、液状化安全率 F_L は液状化強度比 R_{L20} を実際に作用した繰返し応力比 R で除した値とした。

また、液状化後の供試体の剛性が回復するまでに要する区間を微小抵抗領域とし、微小抵抗領域での傾きを剛性 G_1 とした。さらに図より得られた G_1 を有効拘束圧 σ'_c で除した値と F_L の関係を「ALID」解析で用いられている安田・稲垣の式³⁾にプロットしたものを図 6 に示す。図 2 より、 $F_c=20\%$ の変形挙動は安田らの研究²⁾で報告されている砂の変形挙動と同様であった。一方、

図 3~図 5 では、 G_1 は大きく低下しているが、図 2 に比べると G_1 が非常に大きな傾きとなっていることがわかる。これは細粒分が骨格を形成し、砂より細粒分の液状化後の剛性が発揮されたためと考えられる。つまり、 G_1 に着目すると、ある程度の細粒分含有率 F_c に達するまでは砂と類似した剛性低下傾向を示すが、それを上回ると細粒土特有の傾向を示すことがわかる。また、図 6 より $F_c=20\%$ では $R_{L20}=0.172$ であり、プロット点は $R_L=0.15$ の曲線とほぼ同様の傾向を示している。一方、 $F_c=40\%$ 、 60% 、 80% は $R_{L20}=0.100\sim 0.123$ であり、 $R_L=0.15$ の曲線より下にプロットされるはずであるが、今回の結果は $R_L=0.20\sim 0.30$ の曲線の間にプロットされている。つまり、低塑性細粒分を多く含む砂層において液状化強度比 R_{L20} が小さな値であっても、液状化後の剛性 G_1 については砂よりも非常に大きな値となることが分かる。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 細粒分が低塑性である場合、一般的傾向と異なり、細粒分含有率 F_c が高い方が液状化強度比 R_{L20} は小さくなる。その傾向は $F_c=40\%$ 以上の場合に見られる。
- 2) 細粒分が低塑性である場合、液状化後の剛性 G_1 は、細粒分含有率 F_c が 20% 程度以下であれば砂と同程度の値を示し、 F_c が 40% 程度を超えると砂よりも大きな値を示す。

参考文献

- 1) 佐藤正行ら：細粒分が埋立地盤の液状化特性に及ぼす影響に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.561/III-38，pp271-282，1997。
- 2) 安田進ら：繰返しねじりせん断試験による液状化砂の強度・変形特性，第 22 回地盤工学研究発表会，pp19-22，1993。
- 3) 安田進ら：液状化を含む繰返し軟化時における種々の土の変形特性，第 40 回地盤工学研究発表会，pp525-526，2005。

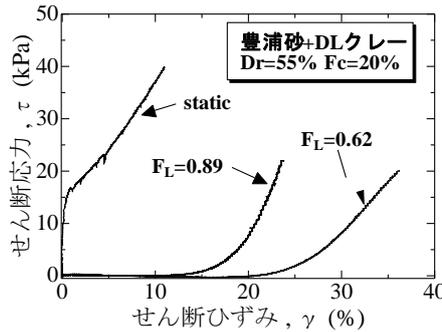


図 2 τ と γ の関係 ($F_c=20\%$)

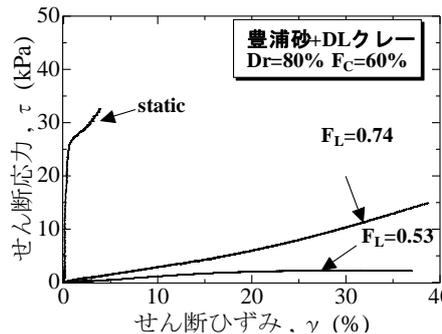


図 4 τ と γ の関係 ($F_c=60\%$)

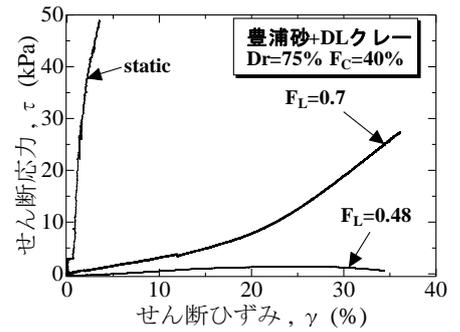


図 3 τ と γ の関係 ($F_c=40\%$)

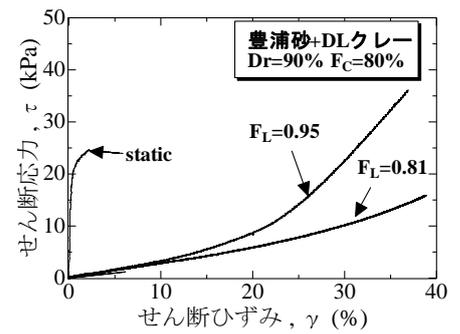


図 5 τ と γ の関係 ($F_c=80\%$)

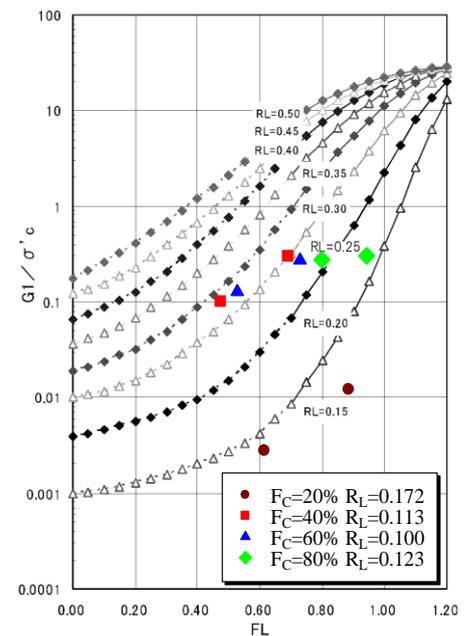


図 6 安田・稲垣の式³⁾との比較